

'96卷

大连理工大学教授学术丛书

鞍点规划与 形位误差评定

SADDLE POINT
PROGRAMMING
AND GEOMETRIC
ERROR
EVALUATION

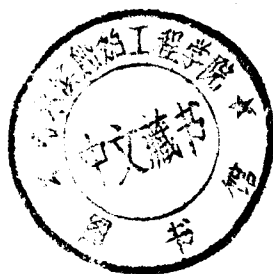
刘健 王晓明 著

大连理工大学出版社

0301
167
333447
大连理工大学教授学术丛书 '96 卷

鞍点规划与形位误差评定

刘 健 王晓明 著



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

鞍点规划与形位误差评定/刘健,王晓明著. —大连:大连理工大学出版社,1996.12

(大连理工大学教授学术丛书'96卷)

ISBN 7-5611-1136-3

I. 鞍… II. ①刘…②王… III. 鞍点-规划-应用-形位误差评定
IV. TG83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 10405 号

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

鞍点规划与形位误差评定

刘健 著
王晓明

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连海事大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.25 字数: 257 千字

插图: 4

1996 年 12 月第 1 版

1996 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

责任编辑: 方延明 刘新锋

责任校对: 春 杨

封面设计: 孙宝福

ISBN 7-5611-1136-3

TH · 21

定价: 16.00 元

前 言

本书总结了作者及作者领导的学科组在近十年间的一些研究成果。事情是从解决一项工程问题开始的,后来涉及到了某些数学理论与方法,正是在这两个领域的交互作用下,推动了工作的进展,并形成了本书的基本框架。为了反映出这个过程的特点,将本书的书名称为《鞍点规划与形位误差评定》。

十年前,关于“形状和位置公差”的国家标准颁布以后,引起了工程界的广泛关注,很快就形成了一个研究的“热点”。正是在这股热浪的推动下,作者与周围的同事及研究生们,对于这项课题表现出浓厚的兴趣。尽管当时还知之甚少,但讨论却是很热烈的。大家很快就发现了和长度及角度的测量与评定相比,形位误差的测量与评定的难度要大得多。对于这个问题的解决,要涉及到一些近代数学知识。这一方面说明了课题的学术价值与实际意义,同时也使研究工作带上了某些“边缘”色彩。

在探索解决问题的路子中,大家把相关的数学方法一一试过。最早采用的是“最小二乘法”,这是大数学家高斯(Gauss)在任哥丁根天文台台长时,为解决大地测量的数据处理问题,所首先提出的数学方法,其基本思想是“平差”,即使残差平方和为最小。使用最小二乘法进行形位误差评定,解算迅速、结果稳定,很受工程界的欢迎。但严格地讲,最小二乘评定“平差”的目标,并不符合“最小条件”,虽然有许多优点,乃仍属于一种近似的评定方法。

形位误差评定的最小条件要求,使零件上的最大误差最小化,在数学上称之为“极大中的极小”或“极小中的极大”问题,这就同函数的一致逼近理论自然地联系起来了。函数的一致逼近思想,是

数学家、机械学家切比雪夫(Чебышев),在解决机构学的综合问题时首先提出的,因此一致逼近又称切比雪夫意义下的逼近。其基本条件已由切比雪夫定理所给出,像直线度误差评定就是一个典型的一致逼近问题。其最小条件“内含准则”,即为切比雪夫定理中“交错点组”的再现。求解函数的一致逼近问题,通常采用里米兹(Ремез)方法,这是在预选交错点组的条件下,通过逐次逼近而求最优解的方法。它的求解思路,已渗透于形位误差评定的算法之中,如在目前应用较广的“置换算法”中,就可见到里米兹方法的影子。一致逼近与最佳平方逼近(最小二乘)是函数逼近的两种重要方法。在形位误差评定的研究中应用一致逼近方法,其最突出的优点是符合评定的最小条件,但具体的解算却并不轻松,况且除直线度外,像圆度、平面度、圆柱度等评定问题,均属于多元函数一致逼近问题,这部分理论还正在发展之中,又比较艰深,使用起来不那么得心应手。

在近20年间,数学规划理论与方法有了长足的进展,它在工程领域中产生了深远的影响,促进工程研究由经验走向量化阶段。这就吸引了国内外的一批学者,采用数学规划方法研究形位误差评定问题,并很快成为了一种主导的潮流,当然也成为我们所关注的焦点。在具体处理时,一般是采用两步法,即首先求目标函数对一组变量的极大值,再求它对另一组变量的极小值,将这两步联结起来便可处理“极大中的极小”问题了。实践表明,数学规划方法无论在评定的理论研究,还是在评定的解算方面,都显示出明显的优越之处。当然这并不意味着这种方法已经达到了完美的程度,像局部最优解与全局最优解的鉴别;解算迂回造成的死循环;当数据量偏大时求解速度低等问题,还不时产生困扰,亟待解决。

在这个背景下,经过一段较长时间的摸索得到了一个共识:形位误差评定研究的进展,往往同数学方法的正确选择与改进密切相关,所谓“工欲善其事,必先利其器”,正是这个道理。谈到鞍点规

划的构思,不能不提到作者在60年代学习“对策论”时所受到的启示,在二人对抗的情况下,最佳对策的选择并非是单纯的“收益”最大或“支付”最小,而是“在最小支付的前提下,获得最大收益”,数学上把其最优解点称为“鞍点”。这一极富建设性的选择已经包含了鞍点的思想,把这一思想提炼出来:其实任何事物的内在规律,取决于其基本矛盾双方的相互联结又相互制约的关系,这就是说任何“最佳”、“最优”都不是绝对的、抽象的,而是有条件的、具体的,鞍点从一个侧面反映了这种辩证关系,如何将这个思想注入于数学规划之中,这就是研究鞍点规划的最初动因。

形象地说,所谓鞍点就是处于“马鞍中央的点”,从纵向看,取极小值,从横向看取极大值。而鞍点规划就是:以寻求目标函数的鞍点为目标的一种数学规划,用以解决“极大值的极小化”或“极小值的极大化”问题,可以方便地处理形位误差评定等一类广泛的工程问题,并且在相关的数学分支中,也是一种有效的工具。

工作是从“线性鞍点规划”研究开始的,此间吴宏基副教授(博士)、安立邦高级工程师参与了工作,并付出了辛勤的劳动。当理论工作初具规模时,我们当即应用于形位误差评定的研究中,结果是令人鼓舞的。钱名海副教授(博士),在这一基础上研究了非线性鞍点规划的基础及其在形位误差评定中的系统应用。应当提到的是王晓明博士在后续研究工作及本书撰写中所做的贡献,在经常的讨论中,取得了系统的规律性的认识,将过去尚处于经验总结的一些问题,提高到了理性化的层次。

十年岁月转瞬即逝,但社会各界对此项工作的支持,却留在我们的记忆之中。一些阶段性成果曾在国内外重要学术会议上发表,在交流和切磋中推动了工作的进展。与此同时,国内的《计量学报》、《计量技术》等刊物,发表了有关鞍点规划与形位误差评定的系列论文,在这种学术氛围中,以贝季瑶教授、熊有伦教授(中国科学院院士)为首的一批专家学者提出了许多宝贵的意见和建议。

1993年,以“位置误差评定理论评定技术及智能化检测系统的研究”为题的国家自然科学基金项目获得了批准,至此研究工作呈现出“顺风顺水”之势。在研究成果的转化方面,也得到了以上海机床厂为首的一批企业单位的大力支持,在上海机床厂周勤之总工程师(中国工程院院士)的积极倡导下,促进了厂校的迅速联合。针对国产圆度仪升级换代的需要,钱名海副教授编制了系统的应用软件,安装于该厂生产的“形位误差测量机”上。此外,在解决航天器大型椭圆回转面零件的数字化加工、出口产品空间直线度误差评定等攻关课题或技术关键上,鞍点规划方法也都发挥了功效。

作者及作者所在的学科组属于机械工程,只是为了形位误差评定研究的需要才涉足了数学规划领域,并力求在理论与实践相结合上,把工程问题搞得更明白。从数学角度来看,本书的内容及表述会有很多笨拙之处,也许会隐藏一些错误,欢迎批评指正。但从我们的本意来看,希望在基础与应用之间架起一座桥梁,使彼此相互通达,在渗透和交叉中求得共同发展,这需要各方面的不懈努力。

本项课题的研究得到了国家自然科学基金的资助,本书的出版又得到了大连市学术专著资助出版评审委员会的资助,在此,一并表示感谢。

刘 健

1996年5月于大连

目 录

前言

第一章 数学规划与鞍点规划的一般原理	1
1.1 鞍点规划概述	1
1.1.1 数学规划概述	1
1.1.2 鞍点规划的发展背景	3
1.2 凸集及其分离性	6
1.2.1 凸集	6
1.2.2 凸集的分离性	9
1.3 函数的分类	12
1.4 平稳点	18
1.5 凸规划与鞍点规划	22
1.6 约束优化的最优性条件	25
1.7 约束鞍点规划的最优性条件	32
第二章 不可微函数的鞍点规划	34
2.1 一类鞍点规划	34
2.2 二类鞍点规划	37
2.3 有效约束及其特征	42
2.4 最优性必要条件的几何解释	46
第三章 鞍点规划的解法	51
3.1 线性鞍点规划的单纯形解法	51
3.2 线性鞍点规划的对偶解法	60
3.3 无约束非线性规划求解方法	64
3.4 约束规划的乘子法	69

3.5 非线性鞍点规划的解法	72
第四章 鞍点规划的应用	76
4.1 曲面逼近	76
4.2 混合对策	82
4.3 H_{∞} 控制要义	88
4.4 平面机构的综合	90
第五章 回转运动群及微分几何学基础	94
5.1 圆矢量函数	94
5.2 回转运动群	98
5.2.1 回转运动群及其性质	98
5.2.2 回转群的解析运算	101
5.3 曲线的标架及 Frenet 公式	105
5.3.1 曲线的基本三面形	105
5.3.2 曲线的标架与 Frenet 公式	109
5.3.3 相伴曲线方法	114
5.4 曲面的微分形式及标架运算	119
5.4.1 曲面的微分形式	119
5.4.2 曲面的标架及其微分运算	123
5.4.3 相伴曲面方法	128
第六章 形位误差评定的几何模型	132
6.1 概述	132
6.2 平面曲线形状误差评定的几何模型	134
6.2.1 理论几何模型	134
6.2.2 线性几何模型	138
6.3 典型平面曲线的误差变换	144
6.3.1 简单常用的平面曲线	144
6.3.2 常用螺线	145
6.3.3 渐开线、泛渐开线	146

6.3.4 摆线、泛摆线	148
6.4 曲面形状误差评定的几何模型	153
6.4.1 理论几何模型	153
6.4.2 线性几何模型	158
6.4.3 误差估计	162
6.5 典型曲面的误差变换	166
6.5.1 常用简单曲面	166
6.5.2 柱面与锥面	168
6.5.3 回转面	172
6.5.4 螺旋面	174
6.6 平面孔组位置度误差与空间直线度误差 评定的几何模型	177
6.6.1 平面孔组位置度误差评定的几何模型	177
6.6.2 空间直线度误差评定的几何模型	183
6.7 统一的几何模型	188
第七章 形位误差评定的规划模型	191
7.1 形位误差的包容评定	191
7.2 形位误差评定的规划模型及统一分类	197
7.2.1 形位误差评定的规划模型	197
7.2.2 形位误差评定的统一分类	203
7.3 典型形位误差评定的规划模型	207
7.3.1 直线及平面曲线形状误差评定	207
7.3.2 平面及曲面的形状误差评定	213
7.3.3 位置误差评定	217
7.4 形位误差的最小二乘评定	220
7.4.1 最小二乘原理	221
7.4.2 形位误差评定的最小二乘模型	223
7.4.3 典型形位误差评定的最小二乘模型	229

7.5 形位误差测量数据的预处理	241
7.5.1 平面测量数据的预处理	242
7.5.2 坐标法测量数据的预处理	247
第八章 形位误差评定的最小条件	252
8.1 最小条件与特征点的特征	252
8.2 映射空间	257
8.2.1 特征向量的结构	257
8.2.2 最小条件式与单位法向量的特征	261
8.3 最小条件	266
8.3.1 特征点的总数及其分配	266
8.3.2 特征点的分布规律	275
8.4 最小条件图示	276
8.4.1 特征点及特征点凸体的投影	276
8.4.2 投影判别准则	280
8.5 典型形位误差评定的最小条件	283
8.5.1 理想要素为平面曲线的评定问题	283
8.5.2 理想要素为曲面的评定问题	286
8.6 空间直线度误差评定的最小条件	291
8.7 关于最小条件充分性的讨论	297
8.8 对形位误差评定结果的仲裁	301
参考文献	308
后记	310

Contents

Preface

Chapter 1 Mathematical programming and saddle point

programming basic theory	1
1.1 Introduction to mathematical programming	1
1.1.1 General statement of mathematical programming	1
1.1.2 Background to saddle point programming	3
1.2 Convex sets and separation theorem	6
1.2.1 Convex sets	6
1.2.2 Separation theorem	9
1.3 Classification of the functions	12
1.4 Stationary points	18
1.5 Convex programming and saddle point programming	22
1.6 The Kuhn—Tucker condition to constrained optimization	25
1.7 The Kuhn—Tucker condition to saddle point programming	32

Chapter 2 Nondifferentiable functions saddle point

programming	34
2.1 The first class of saddle point programming	34
2.2 The second class of saddle point programming	37
2.3 Effective constraints and their characteristics	42

2. 4	Geometrical interpretation of the necessary conditions for saddle point programming	46
Chapter 3 The saddle point programming		
	algorithm	51
3. 1	The simplex method for linear saddle point programming	51
3. 2	The dual simplex method for linear saddle point programming	60
3. 3	Unconstrained nonlinear programming algorithms	64
3. 4	The generalized Lagrange multiplier technique for constrained optimization	69
3. 5	Nonlinear saddle point programming algorithms	72
Chapter 4 Applications of saddle point programming		76
4. 1	Surface fit	76
4. 2	Mixed strategies	82
4. 3	H_{∞} control problem	88
4. 4	The synthesis of plane mechanisms	90
Chapter 5 Rotation groups and the basic theory		
	of differential geometry	94
5. 1	Circle vectors	94
5. 2	Rotation groups	98
5. 2. 1	Rotation groups and their proprieties	98
5. 2. 2	The differential calculation of rotation groups	101
5. 3	Moving frames and the Frenet formulae	105
5. 3. 1	The moving trihedron of space curves	105

5. 3. 2	Moving frames and the Frenet formulae	109
5. 3. 3	The Cecaro' method of curves	114
5. 4	Surface fundamental differential forms and the method of moving frames	119
5. 4. 1	Differential forms	119
5. 4. 2	Moving frames and equations of structure	123
5. 4. 3	The Cecaro' method of surfaces	128
Chapter 6 The geometric theory of the geometric error evaluation		
6. 1	Introduction to the geometric error	132
6. 2	The geometric theory of the plane curves shape error evaluation	134
6. 2. 1	The theoretic geometric model	134
6. 2. 2	The linear geometric model	138
6. 3	Typical plane curves error transformation	144
6. 3. 1	Common and simple plane curves	144
6. 3. 2	Common spirals	145
6. 3. 3	Involutes	146
6. 3. 4	Cycloids	148
6. 4	The geometric theory of the surfaces shape error evaluation	153
6. 4. 1	The theoretic model	153
6. 4. 2	The linearized model	158
6. 4. 3	The error estimation of the linear model	162
6. 5	Typical surfaces error transformation	166
6. 5. 1	Common and simple surfaces	166
6. 5. 2	Cylinders and cones	168
6. 5. 3	Surfaces of revolution	172

6. 5. 4	Helicoidal surfaces	174
6. 6	The geometric theory of the plane holes position error and the straight line geometric error evaluation	177
6. 6. 1	The geometric theory of the plane holes position error evaluation	177
6. 6. 2	The geometric theory of the straight line error evaluation	183
6. 7	The regularized geometric error transformation method	188
Chapter 7	The programming theory of the geometric error evaluation	191
7. 1	The geometric error enclosure evaluation	191
7. 2	The programming models of the geometric error evaluation and their classification	197
7. 2. 1	The programming theory of the geometric error evaluation	197
7. 2. 2	The classification of the geometric error evaluation problems	203
7. 3	The programming theory of typical geometric error evaluation	207
7. 3. 1	The geometric error evaluation method of the straight line and plane curves	207
7. 3. 2	The geometric error evaluation method of the plane and surfaces	213
7. 3. 3	The geometric position error evaluation	217
7. 4	The least squares method of the geometrical error evaluation	220

7.4.1	The least squares method	221
7.4.2	The least squares model of geometrical error evaluation	223
7.4.3	About the typical geometrical error evaluation problem	229
7.5	The geometric error data pre-processing algorithms	241
7.5.1	The plane measurement data pre-processing	242
7.5.2	The Cartesian ordinates date pre-processing	247
Chapter 8	The minimum condition of geometric error evaluation	252
8.1	The properties of the minimum condition and characteristic points	252
8.2	Mapping space	257
8.2.1	The structure of characteristic vector	257
8.2.2	The minimum condition expressions and unit normal vector characteristics	261
8.3	The minimum condition	266
8.3.1	The number and distribution of characteristic points	266
8.3.2	The distribution rule of characteristic points	275
8.4	The diagram of minimum condition	276
8.4.1	The characteristic point and the characteristic point convex projection	276
8.4.2	The judgement principle of projection	280
8.5	The minimum condition of the typical geometric error evaluation	283
8.5.1	The plane curve evaluation problem	283

8.5.2	The surface evaluation problem	286
8.6	The minimum condition of the straight line error evaluation	291
8.7	Discussion to the sufficiency of minimum condition	297
8.8	The arbitration of geometric error evaluation	301
Bibliography		308
Postscript		310